

Interférométrie Spatiale dédiée à la Recherche de Planètes Extrasolaires: Simulations des Propriétés d'Imagerie et de Spectroscopie

Bertrand Mennesson

Observatoire de Paris, DESPA, 92195 Meudon Cédex, France

RÉSUMÉ

Parmi les différentes techniques envisagées pour détecter et caractériser des planètes extrasolaires orbitant autour d'étoiles proches, l'interférométrie spatiale infrarouge est la seule qui permette une détection directe de planètes telluriques et le sondage de leur atmosphère par spectroscopie. Nous nous intéressons ici exclusivement à la pupille d'entrée d'un tel interféromètre, et à l'optimisation de ses propriétés d'imagerie et de spectroscopie. Après avoir passé en revue les contraintes imposées par les principales sources de bruit astrophysique, nous proposons une configuration à 5 télescopes, répartis sur une base d'environ 50m sur 25m. Avec un tel réseau interférométrique, un temps d'intégration de 30h permettrait de reconstruire une "image" d'un système planétaire situé à 10pc et analogue au notre. La spectroscopie des planètes ainsi détectées pourrait révéler la présence de vapeur d'eau, de dioxyde de carbone, et d'ozone en quelques semaines d'intégration.

ABSTRACT

Among the various techniques used to detect and characterize extra-solar planets, infrared space interferometry is the only one that can directly detect Earthlike planets orbiting nearby stars, and provide us with a spectrum of their atmosphere. We concentrate here exclusively on the pupil of such an interferometer, and optimize its imaging and spectroscopic properties. We review the general design constraints set by the main astrophysical noise sources, and then present a solution with 5 telescopes deployed in an elliptical array of 50 by 25m. With this array, we can recover a single image of a solar system twin at 10 pc distance, after 30 hr of integration time. The spectroscopy of the planets could then be undertaken, and could reveal absorption features of water, carbon dioxide, and ozone in a few weeks.

1 Introduction

Avec les récentes découvertes ^(1,2,3) des premières planètes extrasolaires, utilisant les techniques de vélocimétrie radiale ou d'astrométrie, l'exploration des systèmes stellaires proches est en train de devenir un sujet astrophysique majeur. Pour aller plus loin dans la caractérisation de ces "exoplanètes", il faut s'orienter vers des méthodes de détection directe. Dans ce cas on ne cherche plus seulement à inférer l'existence de planètes à partir d'observations photométriques ou astrométriques sur l'étoile mère, mais à analyser directement la lumière émise par ces planètes. Un interféromètre spatial travaillant dans l'infrarouge, et utilisé dans un mode à frange centrale noire ^(4,5,6), serait particulièrement bien adapté à cette tâche. Il permettrait d'atteindre la résolution et le contraste nécessaires pour détecter des raies d'absorptions essentielles, telles que celles de la vapeur d'eau (en dessous de $8\mu\text{m}$), de l'ozone ($9.6\mu\text{m}$) et du dioxyde de carbone ($15\mu\text{m}$). C'est dans ce sens qu'un projet d'interférométrie spatiale, nommé "DARWIN", ⁽⁷⁾ a été proposé à l'Agence Spatiale Européenne pour son horizon 2000 Plus. L'interféromètre, composé de 4 à 5 télescopes, sera couplé à un spectromètre infrarouge à large bande spectrale (6 à 18 microns). Ce projet présente de nombreux défis technologiques. Une description générale en est donnée par Léger et al. ⁽⁶⁾. Nous nous limitons ici à caractériser les différentes sources de bruit astrophysiques, puis à étudier leur impact sur

la configuration interférométrique et le traitement du signal à adopter.

2 Configurations Interférométriques

Le concept d'interféromètre à frange centrale noire, a été proposé à l'origine par Bracewell et McPhie ⁽⁸⁾. Avec 2 télescopes situés à 25 m l'un de l'autre, la résolution angulaire équivalente à 10 microns est d'environ 0.1 seconde d'arc, ce qui est précisément la résolution nécessaire pour séparer la Terre du Soleil, vus à une distance de 10 pc. Simultanément la lumière émise par l'étoile est fortement éteinte en ajustant convenablement les phases des différents faisceaux avant la recombinaison. On obtient ainsi des interférences totalement destructives sur l'axe de visée de l'interféromètre. Pour une planète située hors de l'axe optique et suffisamment résolue, les interférences sont en revanche constructives. Une rotation de l'interféromètre autour de l'axe optique permet alors de moduler le signal de la planète, qui traverse successivement sur le plan du ciel des franges brillantes et des franges noires. L'étoile, en revanche, reste sur l'axe optique, et voit son signal constamment éteint. Il y a bien sûr des restrictions à cette première analyse :

- L'étoile a une taille angulaire finie, c'est à dire qu'elle n'est pas rigoureusement ponctuelle et alignée avec l'axe optique. Pour détecter des planètes extrasolaires en

des temps d'intégration raisonnables, il faut un taux de réjection sur la lumière de l'étoile de 10^5 à 10^6 . Ceci ne peut être réalisé pour des étoiles proches, et des bases de quelques dizaines de mètres, que si la transmission de l'interféromètre près de l'axe est proportionnelle à θ^4 ou mieux θ^6 , où θ désigne l'offset par rapport à l'axe optique. Cette condition sur l'ordre central d'extinction fixe des relations précises sur l'emplacement des télescopes et les déphasages à appliquer à chacun des faisceaux ⁽⁹⁾. Elle impose notamment d'utiliser au moins 3 télescopes.

- Si l'on suppose qu'un taux de réjection suffisant est atteint, et que le fond d'émission IR due à la lumière zodiacale solaire est réduit d'un facteur 100 ⁽⁶⁾ en travaillant à 5 U.A. du Soleil, la source de bruit astrophysique dominante provient alors de la lumière zodiacale du système observé (notée "exo-ZL" dans ce qui suit). Dans le cas du système solaire, le disque de poussières optiquement et géométriquement mince qui entoure le soleil, dans les 10 premières U.A., émet à 10 microns un flux intégré 400 fois supérieur à celui d'une planète tellurique. En tenant compte de la réjection centrale, tout interféromètre à frange centrale noire va rejeter partiellement ce signal. Pour les configurations proposées actuellement à l'ESA ⁽⁶⁾, et à la NASA ⁽⁵⁾, et pour un système stellaire analogue au notre situé à 10 pc par exemple, nos simulations ⁽⁹⁾ montrent que le rapport des flux est encore de quelques dizaines. Sauf erreur de pointage systématique, le signal stellaire n'est pas modulé lors de la rotation de l'interféromètre. Ses seules variations sont imputables au bruit quantique et aux instruments. Le cas de l'exo-ZL est bien différent : puisqu'elle est résolue par l'interféromètre son signal sera modulé par la rotation du réseau. Pour un système stellaire donné, et une exo-ZL à symétrie circulaire, cette modulation sera d'autant plus intense que le système est vu sous incidence rasante, sur la tranche dans le pire des cas. Si l'on ne prend pas garde à la géométrie de la pupille d'entrée, (plus précisément si celle-ci est réelle), le signal planétaire et celui du à l'exo-ZL seront situés aux memes harmoniques, et quasi indiscernables.

3 Traitement du Signal

Les contraintes précédentes, et d'autres liées à la couverture spectrale ⁽⁹⁾, nous ont amenés à proposer une configuration à 5 télescopes de 1.5m, répartis sur une ellipse de 50m sur 25m. Nous avons ensuite simulé les différents signaux recus de la part d'un système stellaire analogue au notre, et situé à 10pc, avec les niveaux de bruit correspondants. Le nombre de photons détectés suit une statistique Poissonienne, assimilable à une loi normale pour les temps d'intégration considérés. Pour chaque bande spectrale centrée autour de la longueur d'onde λ et pour chaque angle de rotation ϕ de l'interféromètre, nous avons donc synthétisé un signal $I(\lambda, \phi)$.

Puis nous avons effectué un test de maximum de corrélation, en évaluant la quantité :

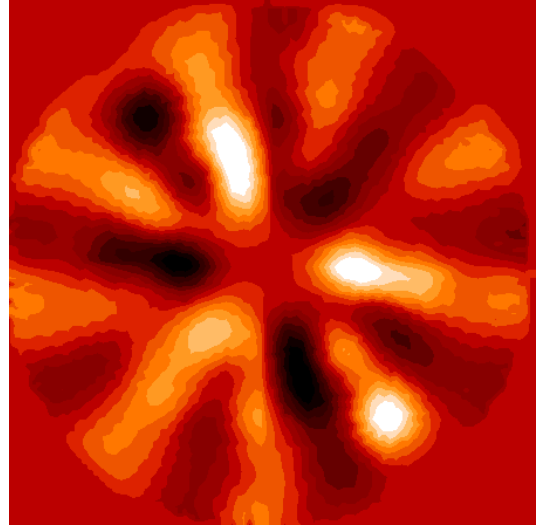


FIG. 1 — Reconstruction d'une image de Venus, la Terre et Mars, tels que vus autour du Soleil, à une distance de 10pc, avec un interféromètre à 5 télescopes.

$$T_{r,\alpha} = \iint_{\lambda\phi} I_{(\lambda,\phi)} \cdot R_{(r,\alpha,\lambda,\phi)} d\lambda d\phi \quad (1)$$

Où $R(r, \alpha, \lambda, \phi)$ est la transmission de l'interféromètre pour une source ponctuelle de coordonnées (r, α) . Dans notre "image", $T(r, \alpha)$ représente la brillance de surface au point de coordonnées (r, α) , et mesure la probabilité d'avoir une source ponctuelle à cet endroit. Pour supprimer toute symétrie circulaire nous avons représenté sur la figure 1, la quantité :

$$T_{r,\alpha} - < T_{r,\alpha} >_\alpha \quad (2)$$

Un temps d'intégration de 30h permet de détecter (seuils entre 3 et 5 σ) les équivalents de Venus, la Terre et Mars, orbitant un étoile de type solaire située à 10pc (figure 1). On suppose que le système est vu sous une incidence de 30 degrés, que la résolution spectrale est de 20, que le rendement total est de 15%, et que le taux de réjection est constamment maintenu au dessus de 10^6 . Les harmoniques dues à l'exo-ZL ont été isolées par traitement de Fourier, et préalablement soustraites du signal $I(\lambda, \phi)$.

Dans son mode spectroscopique, on tourne l'interféromètre autour de sa ligne de visée comme précédemment. Pour chaque bande spectrale, centrée autour de λ , l'énergie E_λ recue par élément de résolution $\Delta\lambda$ de la part d'une planète de coordonnées (r_{pl}, α_{pl}) , est évaluée à nouveau par un test de corrélation, effectué cette fois uniquement sur l'angle de rotation ϕ de l'interféromètre :

$$E_\lambda = \sum_{\phi} I_{(\lambda,\phi)} \cdot R_{(r_{pl}, \alpha_{pl}, \lambda, \phi)} \quad (3)$$

La figure 2 montre le spectre de la Terre, reconstruit à partir d'un temps d'intégration de 700h, comparé au spectre exact attendu à cette résolution. La ligne pointillée correspond à l'émission d'un corps noir à 300K. Les raies d'absorption

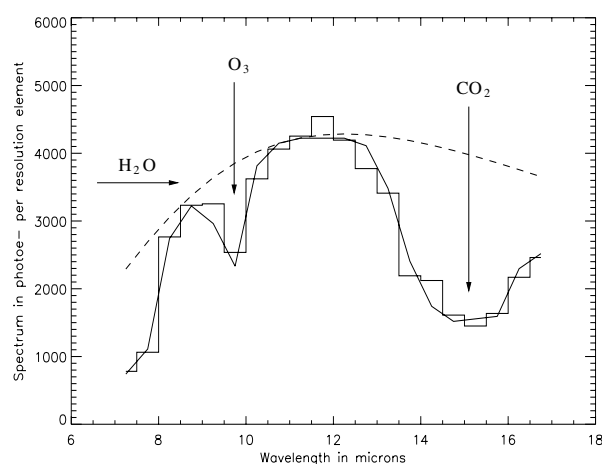


FIG. 2 — Reconstruction du spectre de la Terre entre 7 et 16 microns, avec une résolution de 0.5 micron. La ligne en trait continu indique le véritable spectre attendu à cette résolution.

de la vapeur d'eau, de l'ozone, et du dioxyde de carbone sont clairement identifiables. La détection de l'ozone serait biensur d'une importance capitale, puisque sa présence massive est sans doute la preuve d'une activité de photosynthèse, et de vie primitive basée sur la chimie du carbone ⁽¹⁰⁾.

References

1. Mayor M. and Queloz D. 1995. A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature* **378**, 355-359.
2. Marcy G.W. and Butler R.P. 1996. A planetary companion to 70 Virginis. *ApJ Letters*, **464**, 147.
3. Gatewood G. 1996. Lalande 21185. *BAAS*, **28**, 885.
4. Angel, J.R.P., Cheng, A.Y.S. and Woolf N.J., 1986. A space telescope for IR spectroscopy of Earthlike planets. *Nature* **232**, 341-343
5. Angel, J.R.P. and Woolf, N.J. 1997. An imaging nulling interferometer to study extrasolar planets. *Astrophysical Journal* **475**, 373-379.
6. Léger A., Mariotti J.M., Mennesson B., Ollivier M., Puget J.L., Rouan D., and Schneider J., 1996. Could We Search for Primitive Life on Extrasolar Planets in the near Future? -The DARWIN project- *Icarus* **123**, 249-255.
7. Léger, A. et al. 1993, *The DARWIN Mission Concept*, proposal to the ESA "Horizon 2000 Plus" planning process
- Lovelock, J.E. 1975, *Proc.R.Soc.Land. (B)*, 189, 167
8. Bracewell, R.N. and McPhie R.H. Searching for Non-solar Planets, 1979 *Icarus* **38**, 136-147.
9. Mennesson B., and Mariotti J.M., 1997. Array Configurations for a Space Infrared Nulling Interferometer dedicated to the Search for Earthlike Extrasolar Planets. *Icarus*, in press.
10. Owen, T. 1980, in *Strategies for the Search of Life in the Universe* (ed. Papagiannis M.D.), Reidel, Dordrecht, pp 177-185.